Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 22, No. 4, Winter 2025, p. 475-493

Effect of Brassinosteroid and Melatonin Foliar Application on Biochemical Characteristics and Growth Indices of Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) under Drought Stress Condition

N. Pakgohar[1], A. A. Maghsoudi Mood[2], H. Farahbakhsh[3*], A. Pasandi Pour[4]

1- Ph.D. Student, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
2- Associate Professor, Genetic and Plant Production Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
3- Professor, Genetic and Plant Production Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
4- Ph.D. Graduate, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran
(*- Corresponding Author Email: Hfarahbakhsh@uk.ac.ir)

Received: 28 May 2024 Revised: 30 July 2024 Accepted: 31 August 2024 Available Online: 7 December 2024	**How to cite this article:** Pakgohar, N., Maghsoudi Mood, A. A., Farahbakhsh, H., & Pasandi Pour, A. (2025). Effect of Brassinosteroid and Melatonin Foliar Application on Biochemical Characteristics and Growth Indices of Quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*) under Drought Stress Condition. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *22*(4), 475-493. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88254.1329

Introduction

This research investigates the effects of brassinosteroid and melatonin foliar applications on quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) subjected to drought stress. As a highly nutritious new plant, quinoa is increasingly valued for its tolerance in arid conditions like our country. However, drought stress or irrigation deficit significantly impairs its growth and biochemical composition. Brassinosteroids and melatonin as plant growth regulators are known to enhance plant tolerance to various abiotic stresses, including drought, by modulating physiological and biochemical pathways. This research aims to elucidate how these compounds influence key growth indices, such as plant height, leaf area, biomass, harvest index and as well as biochemical characteristics like soluble carbohydrate, and proline accumulation in quinoa growing under drought stress. By understanding these effects, the study seeks to provide insights into potential agronomic practices to improve quinoa productivity and stress resilience under water-limited conditions.

Materials and Methods

The experiment, conducted at Shahid Bahonar university of Kerman during 2020 and 2021 cropping seasons, used a split-plot layout based on a randomized complete block design with three replications. Main plots consisted of three irrigation levels (100%, 75%, and 50% of field capacity), and sub-plots included five foliar application treatments (control, 0.25 and 0.5 micromolar brassinosteroid, and 0.5 and 1 micromolar melatonin). Soil sampling and nutrient adjustments were made before planting. Trifluralin herbicide was used for weed control, and planting occurred on August 1st with 40 cm row spacing and 3-meter row lengths, followed by immediate irrigation. Foliar applications were conducted at the start of flowering and a week later, early in the

https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88254.1329

morning before sunrise. Water stress treatments began after the first foliar application. Leaf area index (LAI) and Crop Growth Rate (CGR) were measured at the beginning of flowering and one week later, using Gardner's equations. Chlorophyll fluorescence was assessed via the saturation pulse method to determine the maximum quantum yield of photosystem II. Proline and soluble sugars measurements were taken from young leaves post-stress treatment. For morphological trait assessment, including plant height, leaf area, dry weight of aerial parts, and yield components, five plants were randomly sampled from each plot. Biological yield, harvest index, and grain yield were calculated by harvesting plants from the middle four rows, each 2 meters long. Data analysis was performed using SAS v. 9.1, with mean comparisons conducted using Duncan's multiple range test at the 5% probability level.

Results and Discussion

The results showed that foliar application of plant growth regulators (PGR) increased plant height across all irrigation levels. The greatest height, 150.5 cm, was observed with 0.5 micromolar melatonin and 100% field capacity irrigation. Additionally, 0.5 micromolar brassinosteroid with irrigation with 75% of field capacity increased plant height by 11.1% compared to the control at the same irrigation level, with a similar trend under severe drought stress. Increased drought stress reduced the leaf area index (LAI) by 8.37% and 31.6% compared to normal irrigation. The highest concentration of brassinosteroids increased the crop growth rate (CGR) at all irrigation levels (4.8, 4.4 and %16.8 in normal, mild and severe drought stress conditions respectively, but thousand grain weight decreased to %93.3 and %62 of control with rising drought stress. Brassinosteroids were more effective than melatonin in enhancing thousand grain weight. Both brassinosteroid and melatonin applications reduced chlorophyll fluorescence under mild and severe drought stress compared to controls. Soluble carbohydrates content increased by 50.4% at 50% field capacity irrigation compared to normal irrigation. Under mild stress, only brassinosteroid significantly increased proline content, with the highest level (3.19 µmol g^{-1}) at the highest concentration. The highest dry weight, harvest index, and grain yield were achieved with 0.5 micromolar brassinosteroid under mild and severe stress. Brassinosteroids, as new phytohormones, are promising for enhancing crop productivity under stress and non-stress conditions.

Conclusion

Reduction in irrigation from 100% field capacity or increased drought stress led to decreased plant height, growth rate, leaf area index, thousand grain weight, and harvest index, while chlorophyll fluorescence, proline content, and soluble carbohydrates increased. Despite the increases in these two latter mentioned traits, plant dry weight and grain yield decreased under drought stress. The application of brassinosteroids and melatonin improved plant traits, with 0.5 micromolar brassinosteroid being particularly more effective, especially under mild and severe stress. This treatment mitigated drought's negative effects, suggesting its potential to enhance agricultural productivity in arid and semi-arid regions.

Keywords: Chlorophyll florescence, Crop growth rate, Irrigation, Proline, Soluble carbohydrate

نشریه پژوهشهای زراعی ایران
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی
جلد ۲۲، شماره ٤، زمستان ١٤٠٣، ص ٤٩٣-٤٧٥

تأثیر محلول‌پاشی براسینواستروئید و ملاتونین بر ویژگی‌های بیوشمیایی و شاخص‌های رشد کینوا (*Chenopodium quinoa Willd*) در شرایط تنش خشکی

ندا پاک گوهر[١]، علی اکبر مقصودی مود[٢]، حسن فرح بخش[٣]*، امین پسندی پور[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۳/۰۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

چکیده

آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان در سال‌های ۱۳۹۹-۱۳۹۸ و ۱۴۰۰-۱۳۹۹ اجرا شد. سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه) به کرت‌های اصلی و پنج سطح محلول‌پاشی (شاهد، براسینوئید ۰/۵ و ۰/۲۵ میکرومولار، ملاتونین ۱ و ۰/۵ میکرومولار) به کرت‌های فرعی اختصاص داده شدند. با کاهش سطح آبیاری، ارتفاع بوته، سرعت رشد گیاه، شاخص سطح برگ، وزن هزار دانه و شاخص برداشت به‌طور معنی‌داری کاهش، درحالی‌که کلروفیل فلورسانس، محتوای پرولین و کربوهیدرات‌های محلول افزایش پیدا کردند. واکنش حاصل از ویژگی‌های مورد ارزیابی به تنش خشکی منجر به کاهش زیست‌توده و عملکرد دانه گردید. براسینواستروئید و ملاتونین در هر دو غلظت تأثیرات مثبتی را بر ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده داشتند، اما این تأثیرات بر شاخص سطح برگ معنی‌دار نبود. تأثیر براسینواستروئید بر اکثر ویژگی‌ها مؤثرتر از ملاتونین بود، به‌طوری‌که غلظت ۰/۵ میکرومولار آن با کاهش کلروفیل فلورسانس (۸/۸۶ و ۱۰/۵۸ درصد به‌ترتیب در تنش ملایم و شدید)، افزایش محتوای پرولین (۱۶/۴۲ و ۱۳/۴۹ درصد)، افزایش سرعت رشد گیاه (۴/۴ و ۱۶/۸ درصد) و دیگر ویژگی‌های مؤثر منجر به افزایش وزن خشک و عملکرد دانه در سطوح تنش ملایم و شدید نسبت به عدم محلول‌پاشی در همین شرایط شد. عملکرد دانه در تنش ملایم و با کاربرد ۰/۵ میکرومولار براسینواستروئید نسبت به شاهد در شرایط نرمال آبیاری تنها ۳/۷۳ درصد کمتر بود و لذا، این تیمار می‌تواند در رفع اثر سوء تنش خشکی در کینوا مؤثر واقع گردد.

واژه‌های کلیدی: آبیاری، پرولین، سرعت رشد گیاه، فلورسانس کلروفیل، کربوهیدرات‌های محلول

مقدمه

خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده رشد گیاهان در ایران است. به‌واسطه نزولات جوی پایین، بخش اعظم کشور در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار گرفته است، به‌طوری‌که میانگین بارش در ایران، ۲۷۴ میلی‌متر، در مقایسه با میانگین آن در سطح کره زمین، ۶۸۰ میلی‌متر، بسیار ناچیز است (Alizadeh, 2001). از طرف دیگر، حدود ۲۵ میلیون هکتار از اراضی کشاورزی کشور واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک است (Bijanzadeh, Nosrati, & Egan, 2010). لذا انتخاب محصولات زراعی، به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان نظیر کشور ما از اهمیت بیشتری برخوردار است. کینوا به‌دلیل ارزش غذایی بالا و نیز تحمل بالا به شرایط نامساعد محیطی از اصلی‌ترین منابع غذایی می‌باشد (Vega-Galvez *et al.*, 2010). دانه کینوا (*Chenopodium quinoa Willd*) منبع عالی از منگنز، آهن، پتاسیم، مس، روی و فسفر و نیز حاوی ویتامین‌های گروه ب از جمله ریبوفلاوین، تیامین و نیاسین است. کینوا مقدار پروتئین زیادتری نسبت به اکثر غلات داشته و کیفیت پروتئین آن نیز بیشتر است (Hasanzadeh, Shakerdargah, & Darjani, 2013). این گیاه مقاومت زیادی در برابر تنش‌های غیرزنده داشته و به‌خوبی قابلیت رشد در خاک‌های حاشیه‌ای و فقیر را دارد

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۲- دانشیار، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۳- استاد، گروه مهندسی تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
۴- دانش‌آموخته دکتری، دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
(*- نویسنده مسئول: Email: Hfarahbakhsh@uk.ac.ir)
https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.88254.1329

(Jacobsen, Liu, & Jensen, 2009). دانه آن از نظر تغذیه‌ای بسیار غنی است و ارزش اقتصادی زیادی نیز در میان محصولات کشاورزی در بازار جهانی دارد (Vega-Galvez *et al.*, 2010). ازآن‌جاکه کینوا تحمل زیادی نسبت به شرایط نامساعد محیطی دارد، بنابراین گیاه می‌تواند در تأمین امنیت غذایی کشور به‌ویژه در شرایط خشکسالی، نقش مهمی داشته باشد.

استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد گیاهی، یکی از راهکارهای مؤثر در بهبود کمّی و کیفی محصولات کشاورزی می‌باشد. براسینواستروئیدها با اثر تنظیم‌کنندگی بر رشد گیاه، برای نخستین بار از گرده شلغم (*Brassica rapa*) استخراج شده (Bajguz & Hayat, 2009) و به روش‌های مختلفی رشد و توسعه گیاه را تحت تأثیر قرار داده و موجب بهبود تحمل تنش در گیاه می‌شوند (Ashraf, Akram, Arteca, & Foolad, 2010). آن‌ها قادر هستند که سامانه‌های دفاعی گیاه را در مقابل تنش‌های محیطی مانند خشکی، شوری و دما تقویت نمایند (Ali, Hayat, S., & Ahmad, 2007). براسینواستروئیدها بر عملکرد دانه گیاهان برنج (*Oryza sativa*) و ذرت (*Zea mays*) به فرم افزایش شکل فعال براسینواستروئید از طریق اصلاح، تغییر در اجزای سازنده، متابولیسم و یا مصرف خارجی آن اثر مثبت دارند (Vriet, Russinova, & Reuzeau, 2012).

از دیگر موادی که اخیراً به‌صورت کاربرد خارجی جهت افزایش مقاومت گیاهان به تنش‌ها و یا افزایش عملکرد و کیفیت آن‌ها در شرایط مزرعه استفاده می‌شود، ملاتونین است. ملاتونین یک ترکیب طبیعی ایندول آمین مشتق‌شده از تریپتوفان (اناستیل ۵ متوکسی تریپتامین) است که ابتدا تصور می‌شد که فقط در جانوران وجود دارد (Janas & Posmyk, 2013)، درحالی‌که اخیراً ملاتونین در قسمت‌های مختلف گیاهان شامل ریشه، ساقه، برگ، گل، میوه و دانه تشخیص داده شده است (Jemima, Bhattacharjee, & Singhal, 2011; Reiter *et al.*, 2015). ملاتونین، اعمال مختلف فیزیولوژیکی را در گیاهان موجب می‌شود. این ترکیب علاوه‌بر نقش پیام‌رسانی و تحریک تنظیم‌کننده‌های رشد، نقش قابل‌توجهی به‌عنوان فعالیت آنتی‌اکسیدانی مرتبط با محافظت گیاهان در برابر تنش‌های اکسیداتیو داخلی و محیطی بازی می‌کند (Reiter *et al.*, 2015; Tan, 2015). ملاتونین به‌عنوان خط اول دفاع و حسگر داخلی تنش اکسیداتیو در گیاهان گزارش شده است (Tan *et al.*, 2012). کاهش سرعت فتوسنتز خالص تحت شرایط تنش خشکی، موجب صدمه زدن به فرآیندهای بیوشیمیایی و عوامل غیر روزنه‌ای گیاه می‌شود، از جمله باعث ایجاد تغییر در ساختمان پروتئین می‌شود. به نظر می‌رسد که کاهش محتوای پروتئین تحت تنش خشکی در واکنش پروتئین به رادیکال‌های آزاد و در نتیجه، تغییر اسید آمینه، افزایش فعالیت آنزیم‌های تجزیه‌کننده پروتئین، کاهش سنتز پروتئین و نیز تجمع اسیدهای آمینه آزاد از جمله پرولین باشد (Ranjan, Archana, & Ranjan, 2017).

کاهش شاخص سطح برگ گیاه کینوا در شرایط تنش را می‌توان به کاهش رشد طولی، کاهش تعداد شاخه‌های جانبی و ریزش برگ‌های پایینی نسبت داد. گسترش برگ حساس‌ترین عامل در پاسخ به کمبود آب بوده (Sun, Liu, Bendevis, Shabala, & Jacobsen, 2014) و بستگی به فشار آماس سلولی، دما و جذب کافی منابع برای رشد دارد (bAnjum *et al.*, 2011). کمبود آب باعث کاهش تعداد برگ در بوته، اندازه برگ‌ها و طول عمر آن‌ها شده (Anjum *et al.*, 2011b) و در نهایت، منجر به کاهش سطح برگ می‌شود. پژوهش‌های متعددی نشان دادند که در شرایط تنش خشکی، گسترش برگ ارقام مختلف کینوا کاهش می‌یابد (Sun *et al.*, 2014; Salek Mearaji, Tavakoli, & Sepahvand, 2020). سان و همکاران(Sun *et al.*, 2014) گزارش کردند که در شرایط تنش خشکی، گسترش برگ ارقام مختلف کینوا کاهش می‌یابد. هرچند در پژوهشی دیگر گزارش گردیده که تنش خشکی بر تعداد برگ کینوا تأثیری نداشت (Gonzalez, Gallardo, Hilal, Rosa, & Prado, 2009). تجمع پرولین در برگ به‌منظور حفظ فشار تورژسانس سلول‌های گیاهی، قسمتی از سازوکارهای مقاومت در برابر تنش رطوبتی است. افزایش غلظت پرولین در بافت‌های تنش دیده کینوا نیز گزارش شده است (Dashab & Omidi, 2021). گزارش‌های محدودی در ارتباط با اثر تنش خشکی بر محتوای رنگیزه‌های فتوسنتزی کینوا وجود دارد، در همین راستا گزارش شده است که تنش خشکی موجب کاهش ۲۹ درصدی شاخص سبزینگی گیاه کینوا در مقایسه با آبیاری مطلوب شد (Salek Mearaji *et al.*, 2020). کاهش عملکرد گیاه کینوا در شرایط تنش خشکی به‌طور عمده به‌علت کاهش شاخص‌های رشدی و رنگیزه‌های فتوسنتزی است (Dawood, 2018) و کاهش عملکرد دانه ارقام کینوا در پژوهش‌های مختلفی گزارش شده است (Dawood, 2018; Elewa, Sadak, & Saad, 2017; Telahigue, Yahia, Aljane, Belhouchett, & Toumi, 2017). با این‌که مطالعات زیادی در خصوص براسینواستروئید در گیاهان مختلف انجام شده است، اما تحقیقات اندکی درباره اثرات براسینولید و ملاتونین در شرایط تنش خشکی بر کینوا وجود دارد. از طرفی، با توجه به شرایط اقلیمی کشور، ضروری است که جهت تولید و افزایش محصول کینوا در مناطق خشک و نیمه‌خشک اقدام گردد. بنابراین، در تحقیق حاضر، اثرات براسینواستروئید و ملاتونین بر ویژگی‌های بیوشیمیایی، شاخص‌های رشدی و عملکرد کینوا در شرایط تنش خشکی بررسی شده است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در تابستان سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در مزرعه تحقیقاتی دانشگاه شهید باهنر کرمان با طول جغرافیایی ۵۷ درجه و ۷ دقیقه و ۱۳ ثانیه شرقی، و عرض جغرافیایی ۳۰ درجه و ۱۴ دقیقه و ۳۶ ثانیه شمالی و ارتفاع ۱۷۷۴ متر از سطح دریا انجام شد. تغییرات دمای محل آزمایش در طول دوره رشد در شکل ۱ نشان داده شده است. آزمایش به‌صورت کرت‌های خردشده بر پایه طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا گردید. در این آزمایش، عامل اصلی شامل سه سطح آبیاری (۱۰۰، ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه‌ای (آبیاری نرمال، تنش ملایم و شدید)) و عامل فرعی شامل پنج سطح محلول‌پاشی (شاهد، براسینواستروئید (Sigma, Germany. CAS No:73-31-4) ۰/۵ و ۰/۲۵ میکرومولار، ملاتونین (Fluka Chemika, E1641) ۱ و ۰/۵ میکرو مولار) بودند. قبل از کاشت نمونه‌گیری از خاک در عمق‌های صفر تا ۳۰ سانتی‌متر و ۳۰ تا ۶۰ سانتی‌متر انجام شد و افزودن مواد غذایی به خاک براساس نتایج آزمون خاک (جدول ۱) انجام گردید. کود فسفر از منبع سوپرفسفات تریپل و به‌میزان ۱۰۰ کیلوگرم در هکتار به‌صورت پایه و کود نیتروژن به‌میزان ۱۵۰ کیلوگرم در هکتار از منبع اوره و در سه مرحله، به‌صورت پایه، در مرحله شش برگی و اواسط گل‌دهی در اختیار گیاه قرار داده شد. به‌منظور مهار علف‌های هرز، علف‌کش ترفلان به‌میزان دو لیتر در هکتار در محل مورد نظر جهت کاشت استفاده و به کمک دیسک با خاک مخلوط گردید. کاشت بذور کینوا، رقم Titicaca، در اول مرداد ماه به‌صورت خطی و به‌فاصله ۴۰ سانتی‌متر و به‌طول سه متر انجام و کرت‌ها بلافاصله آبیاری شدند. در هر کرت فرعی، شش خط با تراکم بالا کشت شد. جهت دستیابی به تراکم مورد نظر، در مرحله سه تا چهار برگی با عملیات تنک، فاصله بوته‌ها در روی ردیف به ۷/۵ سانتی‌متر تنظیم و تراکم ۳۳ بوته در مترمربع حاصل شد. آبیاری به‌صورت جوی و پشته و با استفاده از لوله و کنتور حجمی صورت گرفت، به‌طوری‌که میزان آب مصرفی برای تیمار ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه، آبیاری نرمال ۶۴۴۰ مترمکعب در هکتار محاسبه گردید. پس از کاشت تا زمان سبز شدن و استقرار بوته‌ها، آبیاری به‌صورت کامل انجام شد. محلول‌پاشی در دو مرحله رشدی، یک‌بار در شروع خوشه‌دهی و یک‌بار در شروع دانه‌بندی و در دو نوبت در اوایل صبح و قبل از طلوع آفتاب با استفاده از سمپاش دستی انجام شد. تیمارهای تنش پس از اولین مرحله محلول‌پاشی اعمال شدند.

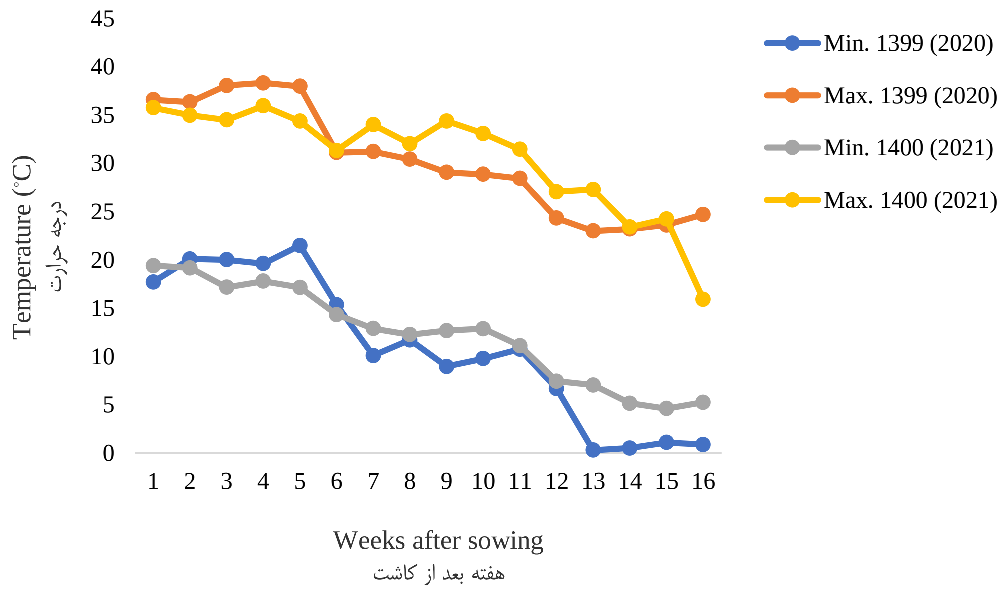
به‌منظور محاسبه شاخص سطح برگ و سرعت رشد محصول از روابط (۱) و (۲) استفاده گردید (Gardner, Pearce, & Mitchell, 1985):

$$LAI= [(LA_2+ LA_1)/2] \times 1/ GA \quad (۱)$$

$$CGR= 1/ GA \times [(W_2- W_1)/ (T_2- T_1)] \quad (۲)$$

که در آن‌ها، LA: سطح برگ، GA: سطح زمین، W: وزن خشک و T: زمان می‌باشد.

اندازه‌گیری شاخص سطح برگ در شروع گل‌دهی و همزمان و سپس یک هفته بعد از آن نمونه‌گیری جهت اندازه‌گیری سرعت رشد محصول انجام شد.



شکل ۱- میانگین هفتگی دمای حداقل و حداکثر طی مدت اجرای آزمایش در دو سال زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰

Figure 1- Average weekly minimum and maximum temperature along experiment in years 2020 and 2021

جدول ۱- ویژگی‌های فیزیکو شیمیایی خاک محل آزمایش
Table 1- Soil physicochemical properties at the experimental location

مشخصات خاک Soil properties	عمق خاک Soil depth			
	سال 1399/2020		سال 1400/2021	
	0-30 cm	30-60 cm	0-30 cm	30-60 cm
بافت خاک Soil texture	Loam	Loam	Loam	loam
نیتروژن Nitrogen (ppm)	0.05	0.055	0.06	0.07
فسفر Phosphorus (ppm)	7.05	8.00	7.44	8.30
پتاسیم Potassium (ppm)	290	295	310	320
هدایت الکتریکی EC (dS m^{-1})	2.3	2.1	2.5	2.2
اسیدیته pH	7.4	7.5	7.5	7.65
ماده آلی Organic matter (%)	0.42	0.4	0.46	0.44

فلورسانس کلروفیل با روش پالس اشباع اندازه‌گیری شد. در این روش، ابتدا برگ به‌مدت ۱۰ تا ۱۵ دقیقه قبل از اندازه‌گیری و شروع آزمون در شرایط تاریکی قرار گرفته و در ادامه، F_0 یا فلورسانس حداقل بدون نور فعال اندازه‌گیری و سپس با استفاده از یک پالس اشباع (حدود ۸۰۰۰ میکرومول بر مترمربع بر ثانیه برای ۰/۶ تا ۱ ثانیه)، فلورسانس به حداکثر مقدار (F_m) افزایش داده شد. این اندازه‌گیری اجازه می‌دهد تا حداکثر بازده کوانتومی فتوسیستم II، با توجه به رابطه F_v/F_m تعیین شود. این ویژگی "عملکرد کوانتومی" نامیده شده و به‌صورت رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Kitajima & Butler, 1975):

$$F_v/F_m = (F_m-F_0) / F_m \quad (۳)$$

برای اندازه‌گیری پرولین و قندهای محلول، بعد از محلول‌پاشی و اعمال تیمارهای تنش کم‌آبی از برگ‌های توسعه‌یافته و جوان بوته‌های هر کرت نمونه‌برداری انجام و بلافاصله در فویل آلومینیوم و نیتروژن مایع قرار داده شده و سپس در فریزر ۷۰- درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند. اندازه‌گیری پرولین براساس روش بیتس و همکاران (Bates, Waldren, & Teare, 1973) و قندهای محلول به‌روش ایریگوین و همکاران (Irigoyen, Einerich, & Sánchez-Díaz, 1992) انجام شد.

برای اندازه‌گیری ویژگی‌های ریخت‌شناختی شامل ارتفاع بوته (متر)، سطح برگ (استفاده از Leaf area meter)، وزن خشک اندام هوایی (بعد از خشک کردن در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد داخل آون و با استفاده از ترازو) و بخشی از اجزای عملکرد از جمله وزن هزار دانه (ترازو) تعداد پنج بوته در هر کرت به‌صورت تصادفی انتخاب و ویژگی‌های فوق روی آن‌ها اندازه‌گیری و ثبت شد. جهت اندازه‌گیری عملکرد در واحد سطح، عملکرد بیولوژیک و محاسبه شاخص برداشت (عملکرد دانه به عملکرد بیولوژیک ضرب در۱۰۰)، پس از در نظر گرفتن حاشیه، کل گیاهان چهار ردیف میانی به‌طول دو متر برداشت شدند و وزن خشک کل بوته‌ها (بعد از خشک کردن در آون با دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از ترازو) به همراه وزن دانه ثبت شد.

جهت تجزیه واریانس با استفاده از نرم‌افزار SAS v. 9.1 و مقایسه میانگین‌ها به‌روش آزمون دانکن و در سطح احتمال پنج درصد انجام گرفت.

نتایج و بحث

ارتفاع بوته: اثر متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی به‌طور معنی‌داری این ویژگی را تحت تأثیر قرار داد. به‌علاوه اثر سال نیز بر این ویژگی معنی‌دار بود (جدول ۲). بررسی مقایسه میانگین اثرات متقابل (جدول ۴) نشان داد که محلول‌پاشی (کاربرد تنظیم‌کننده‌های رشد) در هر سه سطح تیمار آبیاری به‌میزان متفاوتی منجر به افزایش ارتفاع بوته گردید. بیشترین ارتفاع بوته (۱۵۰/۵ سانتی‌متر) از تیمار آبیاری به‌میزان ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه همراه با محلول‌پاشی ۰/۵ میکرومولار ملاتونین حاصل شد که با سایر تیمارهای محلول‌پاشی در این سطح از آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشت، درحالی‌که تیمار یادشده از این نظر نسبت به تیمار آبیاری مشابه و بدون محلول‌پاشی، ۱۱/۵۶ درصد افزایش نشان داد. ملاتونین کارآیی فتوسیستم II را در گیاه تحت شرایط خشکی بهبود می‌بخشد. ملاتونین همچنین آسیمیلاسیون دی‌اکسیدکربن و هدایت روزنه‌ای را افزایش می‌دهد (Wang *et al.*, 2013) و بدین طریق باعث افزایش رشد و از جمله ارتفاع بوته می‌شود.

جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی‌های مورفولوژیکی کینوا متأثر از خشکی و محلول‌پاشی با تنظیم‌کننده‌های رشد در سال‌های زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰

Table 2- Variance analysis of morphological traits of quinoa affected by drought and foliar application of PGR in 2018 and 2019 crop years

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	ارتفاع گیاه Plant height	عملکرد Yield	شاخص برداشت Harvest index	وزن خشک Dry weight	وزن هزار دانه 1000-grain weight
Year (a) سال(a)	1	1220.1*	3394.00*	0.890*	51124*	0.1115*
Error a خطای a	2	87.1	362.74	0.070	5503.5	0.008
Drought (b) تنش خشکی (b)	2	24791**	81342.19**	85.0**	712241.59**	2.79**
a×b	2	19.90ns	1074.62*	4.503**	9623.9 ns	0.003 ns
Error b خطایb	8	119.64	176.94	0.015	2868.2	0.011
Foliar application (c) محلول‌پاشی (c)	4	979.00**	3334.69**	2.214**	45473**	0.098**
a× c	4	16.14 ns	39.48 ns	0.091 ns	722.22 ns	0.0006 ns
b × c	8	135.79**	1754.16**	2.34**	20399.2**	0.0049 ns
a × b × c	8	5.5 ns	30.38 ns	0.083 ns	706.3 ns	0.0025 ns
Error خطا	48	24.3	49.58	0.041	863.9	0.003
C.V. (%) ضریب تغییرات	-	4.0	2.7	0.9	2.6	4.5

ادامه جدول ۲- تجزیه واریانس ویژگی‌های مورفوفیزیولوژیکی کینوا متأثر از خشکی و محلول‌پاشی با تنظیم‌کننده‌های رشد در سال‌های زراعی ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰

Continued Table 2- Variance analysis of morphophysiological traits of quinoa affected by drought and foliar application of PGR in 2018 and 2019 crop years

منابع تغییرات S.O.V	درجه آزادی df	کلروفیل فلورسانس Chlorophyll florescence	پرولین Proline	کربوهیدرات Soluble carbohydrates	شاخص سطح برگ Leaf area index	سرعت رشد گیاه Crop growth rate
Year (a) سال (a)	1	0.0386 ns	0.414 ns	2.719ns	0.259 ns	0.28 ns
Error a خطایa	2	0.0557	0.185	118.51	0. 194	3.479
Drought (b) تنش خشکی (b)	2	0.0287**	21.74**	13745.89**	14.92**	165.65**
a × b	2	0.0029 ns	0.051 ns	14.87ns	0.158 ns	1.32 ns
Error b خطایb	8	0.0020	0.341	33.29	0.050	1.17
Foliar application (c) محلول‌پاشی (c)	4	0.0127**	0.320**	131.6**	0.273*	2.07**
a × c	4	0.0004 ns	0.0054 ns	2.88 ns	0.169 ns	0.21 ns
Interaction b × c	8	0.00098 **	0.081**	24.0 ns	0.135 ns	0.34*
a × b × c	8	0.0001 ns	0.0050 ns	4.30 ns	0.028 ns	0.17 ns
Error خطا	48	0.0003	0.019	32.74	0.087	0.16
C.V. (%) ضریب تغییرات	-	2.3	3.5	5.7	7.9	3.1

ns، ** و *: به‌ترتیب غیر معنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال یک و پنج درصد

ns, ** and *: Non . significant and significant at the 1% and 5% probability levels, respectively

شاه و همکاران (Shah, Ullah, Dar, & Komatsu, 2020) نیز گزارش کردند که کاربرد خارجی ملاتونین فشار آماس بالا را حفظ و باعث باز ماندن روزنه‌ها شد که این خود می‌تواند دلیلی بر توسعه سلولی، رشد و افزایش ارتفاع باشد. همچنین کمترین مقدار این ویژگی (۷۱/۵ سانتی‌متر) از تیمار آبیاری به‌میزان ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه و بدون محلول‌پاشی به‌دست آمد (جدول ۴). کمبود آب موجب کاهش تورژسانس سلولی شده و در نهایت، کاهش رشد و توسعه سلولی به‌خصوص در ساقه و برگ‌ها را به دنبال خواهد داشت. کاهش رشد سلول، اندازه اندام را محدود و لذا اولین اثر محسوس کم‌آبی روی گیاه را می‌توان از روی کاهش ارتفاع بوته تشخیص داد (Babai, AminiDehagi, Modares-Sanavi, & Jabbari, 2010). کاربرد براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار در آبیاری با ۷۵ درصد ظرفیت زراعی نه‌تنها منجر به افزایش ۱۱/۱۴ درصدی در این ویژگی نسبت به شاهد مربوط به خود گردید، بلکه بدون تفاوت معنی‌دار باعث افزایش ۲/۸۲ درصدی نسبت به شاهد در آبیاری با ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی گردید. کاربرد این ماده در شرایط آبیاری با ۵۰ درصد ظرفیت زراعی نیز منجر به حداکثر ارتفاع بوته شد. این امر نشان‌دهنده این است که نقش براسینولید بر افزایش ارتفاع بوته در شرایط تنش بارزتر می‌باشد. براسینواستروئیدها طیف گسترده‌ای از واکنش‌ها از جمله تحریک رشد طولی بافت‌های جوان از طریق تقسیم و طویل شدن سلولی و همچنین تمایز آوندی را القا می‌کنند که فرآیند نموی مهمی برای رشد گیاه محسوب می‌شود (Asha & Lingakumar, 2015). برا و همکاران (Bera, Singh, & Kumar, 2014) در تحقیقی روی آفتابگردان (*Helianthus annus*) گزارش کردند که دو مرحله برگ‌پاشی براسینولید در مراحل غنچه‌دهی و گل‌دهی آفتابگردان به‌طور معنی‌داری ارتفاع بوته را در مقایسه با یک مرحله برگ‌پاشی افزایش داد. آن‌ها افزایش ارتفاع بوته را با اثر مثبت براسینولید بر بافت‌های مریستمی گیاه و افزایش تعداد و اندازه سلول‌ها مرتبط دانستند.

جدول ۳- مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده متأثر از سال زراعی

Table 3- Means comparison of measured traits affected by cropping year

سال Year	ارتفاع Height (cm)	وزن خشک Dry weight (g m^{-2})	وزن هزار دانه 1000-grain weight (g)
1	126.2^{a*}	1148 ^{a}	1.31 ^{a}
2	118.8^{b}	1100 ^{b}	1.24 ^{b}

* در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

* Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at %5 probability level, using Duncan multiple range test

شاخص سطح برگ (LAI)

طبق نتایج تجزیه واریانس، اثرات تنش خشکی و محلول‌پاشی بر این ویژگی به‌ترتیب در سطح یک و پنج درصد معنی‌دار گردیدند (جدول ۲). بیشترین شاخص سطح برگ (۴/۳۰) از تیمار آبیاری شاهد (آبیاری به‌میزان ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه) حاصل شد که تفاوت معنی‌داری با این شاخص در دو تیمار دیگر آبیاری یعنی ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه داشت (جدول ۵). همچنین کمترین شاخص سطح برگ (۲/۹۴) از تیمار آبیاری براساس ۵۰ درصد ظرفیت مزرعه حاصل شد که نسبت به آبیاری در سطوح شاهد و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۳۱/۶۳ و ۸/۳۷ درصد کاهش نشان داد. جهت فتوسنتز و تولید ماده خشک، توسعه متعادل سطح برگ ضروری است و در بسیاری از گونه‌های گیاهی اصولاً تنش آبی، رشد و سطح برگ را کاهش می‌دهد (Jaleel *et al*., 2009). یاری و همکاران (Yari, Keshtkar, & Sepehri, 2014) با اعمال تنش خشکی بر گلرنگ بهاره (*Charthamus tinctorius*) گزارش کردند که تنش موجب کاهش معنی‌دار شاخص سطح برگ در این گیاه شد.

جدول ٤- مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد و تنش خشکی بر ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده در کینوا

Table 4- Mean comparisons of interaction of plant growth regulators and drought stress on measured traits in Quinoa

خشکی Drought (%field capacity)	تنظیم‌کننده رشد Plant growth regulator (µm)	ارتفاع Height (cm)	عملکرد Yield (g m^{-2})	شاخص برداشت Harvest index (%)	وزن خشک Dry weight (g m^{-2})	سرعت رشد محصول Crop growth rate (gm^{-2}day^{-1})	کلروفیل فلورسانس Chlorophyll. florecence	پرولین Proline (µmol g^{-1})
100	براسینواستروئید Brasinostroid 0.25	144.6^{a}*	302.0^{a}	24.00^{ab}	1258.2^{a}	15.1^{ab}	0.72^{de}	2.28^{g}
	براسینواستروئید Brasinostroid 0.5	146.8^{a}	302.8^{a}	23.93^{ab}	1265.4^{a}	15.3^{a}	0.73^{de}	2.30^{g}
	ملاتونین Melatonin 0.5	150.5^{a}	297.2^{a}	24.97^{ab}	1239.9^{a}	14.6^{b}	0.74^{cd}	2.31^{g}
	ملاتونین Melatonin 1	149.3^{a}	299.9^{a}	23.93^{ab}	1253.0^{a}	14.9^{ab}	0.72^{e}	2.28^{g}
	شاهد Control	134.9^{bc}	297.7^{a}	24.10^{a}	1235.2^{ab}	14.6^{b}	0.75^{c}	2.27^{g}
75	براسینواستروئید Brasinostroid 0.25	130.7^{c}	276.4^{bc}	23.48^{d}	1176.0^{c}	13.6^{cd}	0.74^{cd}	2.92^{e}
	براسینواستروئید Brasinostroid 0.5	138.7^{b}	286.6^{b}	23.84^{abc}	1202.2^{bc}	14.1^{c}	0.72^{e}	3.19^{d}
	ملاتونین Melatonin 0.5	132.3^{c}	276.8^{bc}	23.76^{bc}	1165.5^{cd}	13.5^{d}	0.75^{c}	2.69^{f}
	ملاتونین Melatonin 1	133.7^{bc}	278.5^{bc}	23.78^{bc}	1171.6^{c}	13.6^{cd}	0.72^{de}	2.78^{f}
	شاهد Control	124.8^{d}	268.0^{c}	23.66^{cd}	1133.1^{d}	13.5^{d}	0.79^{b}	2.74^{f}
50	براسینواستروئید Brasinostroid 0.25	91.0^{f}	205.4^{f}	21.08^{g}	973.5^{f}	10.4^{f}	0.80^{b}	3.96^{b}
	براسینواستروئید Brasinostroid 0.5	105.1^{e}	229.4^{d}	21.67^{e}	1058.2^{e}	11.1^{e}	0.76^{c}	4.29^{a}
	ملاتونین Melatonin 0.5	91.7^{f}	208.0^{ef}	21.38^{f}	972.2^{f}	10.4^{f}	0.79^{b}	3.84^{bc}
	ملاتونین Melatonin 1	91.5^{f}	216.1^{e}	21.50^{ef}	1004.9^{f}	10.4^{f}	0.76^{c}	3.94^{b}
	شاهد Control	71.5^{g}	143.9^{g}	19.08^{h}	753.3^{g}	9.50^{g}	0.85^{a}	3.78^{c}

* در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

* Means in each column followed by the similar letter(s) are not significantly different at %5 probability level, using Duncan multiple range test.

کاهش سطح برگ در شرایط خشکی را می‌توان یک رویداد اجتنابی قلمداد نمود (Torrecillas, Rodriguez, & Sanchez-Blanco, 2003). این رویکرد در هنگام بسته بودن روزنه‌ها سبب به حداقل رسیدن هدررفت آب شده و در بسیاری از گونه‌ها در شرایط تنش رخ می‌دهد (Ruiz-Sanchez, Domingo, Torrecillas, & Perez-Pastor, 2000). از اولین نشانه‌های کمبود آب، کاهش فشار

آماس و در نتیجه، کاهش رشد و توسعه سلول به‌ویژه در ساقه و برگ‌ها ست (Parkash & Singh, 2020). با کاهش رشد سلول، اندازه اندام محدود می‌شود و به همین دلیل، اولین اثر محسوس کم‌آبی بر گیاهان را می‌توان از اندازه کوچک‌تر برگ‌ها، در نتیجه LAI پایین‌تر و ارتفاع کمتر گیاهان تشخیص داد. مقایسه میانگین‌های این ویژگی تحت تأثیر محلول‌پاشی (جدول ۶) نشان داد که کمترین و بیشترین مقدار این ویژگی متعلق به شاهد (عدم محلول‌پاشی) و محلول‌پاشی با ملاتونین ۰/۵ میکرومولار می‌باشد که از نظر آماری اختلاف معنی‌داری دارند. محلول‌پاشی با غلظت یک میکرومولار همین ماده، اثری بر این ویژگی نداشت و با شاهد در یک گروه آماری قرار گرفت. اگرچه کاربرد براسینواستروئید باعث افزایش LAI نسبت به شاهد شد، اما حداکثر افزایش در این ویژگی (۹/۵ درصد) نسبت به شاهد با کاربرد غلظت ۰/۵ میکرومولار ملاتونین حاصل شد. ملاتونین هم یک آنتی‌اکسیدان قوی است و هم در فرآیندهای مختلفی از جمله جوانه‌زنی، نمو و توسعه ریشه و اندام هوایی، افزایش سطح برگ و وزن تر دخالت دارد (Zhang et al., 2015). لی و همکاران (Li et al., 2021) با انجام آزمایشی روی ذرت افزایش اندازه برگ ذرت را با کاربرد ملاتونین گزارش نمودند. فرشاد و همکاران (Farshad, Mirzaei, & Rezaei, 2023) با انجام آزمایشی روی کلم بروکلی (*Brassica oleracea* var. italica) گزارش کردند که بیشترین سطح برگ در شرایط آبیاری شاهد و با کاربرد ملاتونین ۳۰۰ میکرومولار و کمترین سطح برگ در شرایط کم آبیاری و بدون کاربرد ملاتونین حاصل شد. گزارش شده است که ملاتونین در غلظت‌های پایین، ممکن است به‌عنوان یک تحریک‌کننده رشد، درحالی‌که در غلظت‌های بالا، ممکن است به‌عنوان یک عامل بازدارنده رشد ظاهر شود (Zhao, Ye, Wang, Zhou, & Wang, 2017). کاربرد براسینولید در هر دو غلظت باعث افزایش غیر معنی‌دار این ویژگی شد. افزایش شاخص سطح برگ در اثر تیمار براسینولید ممکن است به فعالیت بافت‌های مریستمی گیاه و افزایش تعداد و اندازه سلول‌ها نسبت داده شود که در نهایت، سطح فتوسنتزکننده را افزایش می‌دهد (Bera et al., 2014).

جدول ۵- مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده متأثر از تیمارهای مختلف آبیاری (خشکی)

Table 5- Means comparison of measured traits affected by different irrigation treatments (drought)

آبیاری Irrigation (% of field capacity)	وزن هزار دانه 1000-grain weigh (g)	شاخص سطح برگ Leaf area index	کربوهیدرات محلول Soluble carbohydrate (mg g^{-1} FW)
50	0.93 c*	2.94 c	123.35 a
75	1.40 b	3.94 b	92.99 b
100	1.50 a	4.30 a	82.03 c

* در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند

* Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at %5 probability level, using Duncan multiple range test

جدول ٦- مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده متأثر از محلول‌پاشی تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه

Table 6- Means comparison of measured traits affected by plat growth regulators spraying

تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه Plant growth regulators (µm)	وزن هزار دانه 1000-grain weight (g)	شاخص سطح برگ Leaf area index	کربوهیدرات محلول Soluble carbohydrate (mg g^{-1} FW)
Control شاهد	1.16 c*	3.56 b	98.7 bc
Brasinostroid 0.25 براسینواستروئید	1.28 b	3.74 ab	101.1 ab
Brasinostroid 0.5 ″	1.37 a	3.75 ab	103.3 a
Melatonin 0.5 ملاتونین	1.26 b	3.90 a	96.7 c
Melatonin 1 ″	1.28 b	3.67 b	97.5 bc

* در هر ستون میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند.

* Means in each column followed by similar letter(s) are not significantly different at %5 probability level, using Duncan multiple range test

سرعت رشد گیاه (CGR)

اثر متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی در سطح پنج درصد این ویژگی را تحت تأثیر قرار داد (جدول ۲). براساس مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل، بیشترین میزان سرعت رشد محصول (۱۵/۳ گرم بر مترمربع در روز) از تیمار آبیاری براساس ۱۰۰ درصد ظرفیت مزرعه همراه با محلول‌پاشی ۰/۵ میکرومولار براسینواستروئید به‌دست آمد که با میانگین به‌دست‌آمده از تیمارهای آبیاری مشابه با کاربرد ۰/۲۵ میکرومولار براسینواستروئید و یک میکرومولار ملاتونین اختلاف معنی‌داری نداشت و تنها غلظت بالای براسینواستروئید منجر به افزایش ۴/۸ درصدی و معنی‌دار این ویژگی نسبت به شاهد در این

سطح از آبیاری گردید (جدول ۴). کمترین سرعت رشد محصول (۹/۵ گرم بر مترمربع در روز) برای آبیاری به‌میزان ۵۰ درصد ظرفیت زراعی و بدون محلول‌پاشی ثبت شد. محلول‌پاشی با براسینواستروئید و ملاتونین منجر به افزایش در این ویژگی در سطح آبیاری ۵۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی نسبت به شاهدهای مربوطه در همین سطوح آبیاری گردید، اما حتی بیشترین CGR در آبیاری با ۷۵ درصد ظرفیت زراعی (۱۴/۱ گرم در مترمربع در روز) که از محلول‌پاشی ۰/۵ میکرومولار براسینواستروئید حاصل شد از سرعت رشد شاهد (آبیاری در حد ۱۰۰درصد ظرفیت زراعی) ۳/۴۳ درصد کمتر بود و با آن اختلاف معنی‌داری داشت. به هر صورت، غلظت بالاتر براسینواستروئید در هر سه سطح آبیاری منجر به افزایش CGR گردید. در مطالعه گلستانی فر و همکاران (Golestanifar, Mahmoodi, Fallahi, & Shahidi, 2024) روی کینوا، کمترین میزان این ویژگی در تیمار ۲۵ درصد نیاز آبی مشاهده شد که تا حدی با یافته‌های این تحقیق تطابق دارد. به هر حال، سرعت رشد محصول رابطه مستقیمی با سطح فتوسنتزکننده دارد (Ozoni, Esfahani, Sami Zadeh, & Rabiei, 2008) و در شرایط تنش شدید، کاهش این سطح منجر به دریافت کمتر نور و کاهش بهره‌وری از سایر فاکتورهای رشدی و در نتیجه، کاهش سرعت رشد محصول خواهد شد.

کلروفیل فلورسانس

این ویژگی در سطح احتمال یک درصد تحت تأثیر اثر متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی قرار گرفت (جدول ۲). مقایسه میانگین‌های اثر متقابل مربوطه (جدول ۴) نشان داد که میزان این ویژگی در هر سه سطح آبیاری و در تیمار عدم محلول‌پاشی نسبت به سایر تیمارها در همان سطح آبیاری بالاتر می‌باشد. بنابراین، با تشدید تنش، میزان فلورسانس کلروفیل افزایش یافت. کاربرد هر دو براسینواستروئید و ملاتونین در هر دو غلظت باعث کاهش میزان این ویژگی نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی در تیمار آبیاری مربوطه شد. براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار و ملاتونین یک میکرومولار در هر دو شرایط تنش ملایم و شدید، بیشترین کاهش را در کلروفیل فلورسانس باعث شدند. براسینواستروئید ۰/۲۵ میکرومولار و ملاتونین یک میکرومولار در شرایط عدم تنش به‌طور یکسان و بیشترین کاهش را در این ویژگی به‌وجود آوردند (جدول ۴). براسینواستروئیدها و ملاتونین از طریق سازوکارهای متفاوتی باعث بهبود فلورسانس کلروفیل در گیاهان تحت تنش خشکی می‌شوند. این مواد با افزایش فعالیت آنتی‌اکسیدانی، کاهش پراکسیداسیون لیپیدها، و بهبود پایداری غشاهای سلولی، نقش مهمی در بالابردن تحمل گیاهان به خشکی دارند. زنگ و همکاران (Zhang *et al.*, 2013) گزارش نمودند که ملاتونین موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش تنش اکسیداتیو در گیاهان تحت تنش خشکی شد که باعث بهبود فلورسانس کلروفیل گردید. در مطالعه‌ای که توسط لی و همکاران (Li, Yang, Gan, Yu, & Xie, 2015) انجام شد، مشخص گردید که تیمار گیاهان با ۲۴-اپی‌براسینولید (نوعی براسینواستروئید) موجب بهبود فلورسانس کلروفیل و بهبود عملکرد فتوسنتز در شرایط خشکی شد. این بهبود به‌واسطه افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش پراکسیداسیون لیپیدها بود.

کربوهیدرات‌های محلول

نتایج تجزیه مرکب داده‌های مربوط به کربوهیدرات‌های محلول (جدول ۲) نشان داد که اثر خشکی و محلول‌پاشی به‌طور معنی‌داری این ویژگی را تحت تأثیر قرار دادند. کمترین میزان کربوهیدرات‌های محلول ($82/03$ mg g^{-1} fw) از تیمار آبیاری در حد ۱۰۰ ظرفیت زراعی حاصل شد و با شدت یافتن تنش و کاهش آبیاری به حد ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، میزان این ویژگی افزایش یافت (جدول ۵) و بیشترین محتوای کربوهیدرات محلول از آبیاری در حد ۵۰ درصد ظرفیت زراعی (تنش شدید) به‌دست آمد که افزایش ۵۰/۴ درصد را نسبت به آبیاری نرمال نشان داد. اثر تنش خشکی روی کربوهیدرات‌ها به گونه و بافت گیاهی بستگی دارد (Boroujerdnia, Bihamta, Alami Said, & Abdossi, 2016). یکی از دلایل افزایش قند در گیاهان احتمالاً در نتیجه اختلال در هیدرولیز نشاسته می‌باشد. سرافراز اردکانی (Sarafraz Ardekani, 2019) در مطالعه‌ای روی چند رقم گندم (*Triticum aestivum*) در شرایط خشکی، افزایش مقدار قندهای محلول را در آبیاری با ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در ارقام مورد مطالعه گزارش نمود. مقایسه میانگین‌های این ویژگی تحت تأثیر محلول‌پاشی (جدول ۶) نشان داد که براسینواستروئید در هر دو غلظت ۰/۲۵ و ۰/۵ میکرومولار به‌ترتیب منجر به افزایش ۲/۴ و ۴/۷ درصدی کربوهیدرات نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی شد، اما افزایش در غلظت بالاتر این هورمون، معنی‌دار و مؤثرتر بود. براسینواستروئیدها از طریق سازوکارهای مختلفی مانند افزایش فعالیت آنزیم‌های متابولیک، تنظیم بیان ژن‌ها و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو، موجب افزایش تجمع کربوهیدرات‌های محلول در گیاهان زراعی می‌شوند (Vardhini & Anjum, 2015). تیمار کینوا با ۲۴-اپی‌براسینولید موجب افزایش فعالیت آنزیم‌های ساکاراز و اینورتاز می‌شود که نقش مهمی در تبدیل نشاسته به قندهای محلول دارند. مطالعات نشان داده‌اند که این هورمون گیاهی با افزایش فعالیت این آنزیم‌ها به بهبود تحمل گیاه در برابر تنش خشکی کمک می‌کند. به‌عنوان مثال، در تحقیقی که روی گیاه دارویی گشنیز (*Coriandrum sativum*) انجام شده است، نشان داده شد که تیمار

با ۲۴- اپی‌براسینولید باعث افزایش فعالیت آنزیم‌های مرتبط با متابولیسم کربوهیدرات‌ها شامل ساکاراز و اینورتاز می‌شود (Xu *et al.*, 2023). در تحقیق دیگری، اثرات ۲۴- اپی‌براسینولید بر افزایش تحمل گیاهان کینوا به تنش خشکی بررسی شد و نتایج نشان داد که این تیمار منجر به افزایش فعالیت آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی و کاهش تنش اکسیداتیو در گیاهان می‌شود، که به‌طور غیرمستقیم می‌تواند به تنظیم بهتر متابولیسم کربوهیدرات‌ها کمک کند (Zhou *et al.*, 2024).

پرولین

اثر متقابل خشکی و محلول‌پاشی، این ویژگی را به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر قرار دادند (جدول ۲). مقایسه میانگین‌های اثرات متقابل خشکی و محلول‌پاشی نشان داد که محلول‌پاشی با براسینواستروئید و ملاتونین در هر سه سطح آبیاری، نرمال و تنش ملایم و شدید منجر به افزایش محتوای پرولین گردید و بیشترین افزایش هم از کاربرد ۰/۵ میکرومولار براسینواستروئید حاصل شد، اما این افزایش در سطح آبیاری نرمال معنی‌دار نبود. در تنش ملایم، تنها براسینواستروئید در افزایش محتوای پرولین به‌طور معنی‌داری مؤثر بود و بیشترین محتوای پرولین (۳/۱۹ میکرومول) از کاربرد غلظت بالاتر براسینواستروئید به‌دست آمد. در تنش شدید، کمترین (۳/۷۸ میکرومول) و بیشترین محتوای پرولین (۴/۲۹ میکرومول) به‌ترتیب مربوط به تیمارهای شاهد (عدم محلول‌پاشی) و کاربرد ۰/۵ میکرومولار براسینواستروئید بود که تیمار اخیرالذکر به‌طور معنی‌داری از سایر تیمارها در این سطح از تنش بیشتر بود. کاربرد براسینواستروئید ۰/۲۵ میکرومولار و ملاتونین یک میکرومولار بدون اختلاف معنی‌دار با یکدیگر، منجر به افزایش محتوای پرولین در این سطح از تنش نسبت به شاهد مربوط به خود شدند (جدول ۴). یکی از اثرات قرار گرفتن گیاهان در معرض تنش خشکی افزایش تولید گونه‌های فعال اکسیژن و ایجاد تنش اکسیداتیو می‌باشد. برای مقابله با تنش اکسیداتیو به‌وجودآمده، سیستم دفاع آنتی‌اکسیدانی موجود در گیاهان قادر است که رادیکال‌های آزاد را از بین برده، خنثی و یا جاروب کند. این سیستم شامل آنزیم‌های آنتی‌اکسیدانی مانند کاتالاز و سیستم آنتی‌اکسیدانی غیرآنزیمی مانند پرولین می‌باشد (Li *et al.*, 2024). پرولین در واکنش به تنش خشکی در گیاهان و در سیتوسول تجمع می‌یابد و نقش قابل‌توجهی در تنظیم اسمزی سیتوپلاسمی دارد (Ashraf & Foolad, 2007). گیاهانی که با تنش خشکی روبه‌رو می‌شوند، مقدار زیادی از منابع خود را صرف سنتز تنظیم‌کننده‌های اسمزی از قبیل پرولین نموده تا قادر به حفظ فشار تورژسانس سلول‌های خود باشند (Aranjuelo *et al.*, 2011). مطالعات مختلف انجام‌شده روی گیاه کینوا، حاکی از افزایش محتوای پرولین بر اثر تنش خشکی می‌باشند که با نتایج این تحقیق مطابقت دارد (Elewa ; Miranda-Apodaca, Yoldi-Achalandabaso, *et al.*, 2017; Aguirresarobe, Del-Canto, & Pérez-López, 2018). قاسمی و همکاران (Ghasemi, Jahanbeen, Latifmanesh, H., Faraji, & Mirshekari, 2021) دریافتند که براسینولید در افزایش محتوای پرولین مؤثر بوده و قادر است که تحمل آفتابگردان را در برابر تنش خشکی افزایش داده و آن را از قرار گرفتن در شرایط بحرانی نجات دهد. کاربرد خارجی ۲۴- اپی براسینولید سبب افزایش بیشتر مقدار پرولین در برگ پرچم ارقام برنج (Farooq, Wahid, & Basra, 2009) تحت اثر تیمار کم‌آبی گردید، که با این تحقیق تطابق دارد.

عملکرد ماده خشک: اثر متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی در سطح احتمال یک درصد و سال در سطح احتمال پنج درصد، عملکرد ماده خشک را تحت تأثیر قرار دادند (جدول ۲). عملکرد ماده خشک در سال اول، ۴/۴ درصد بیشتر از سال دوم بود (جدول ۳) که می‌تواند به‌دلیل سرعت رشد بیشتر ناشی از مناسب‌تر بودن درجه حرارت در دوران رشد رویشی باشد (شکل ۱). محلول‌پاشی در هر سه سطح آبیاری منجر به افزایش عملکرد ماده خشک شده است. بیشترین مقدار این ویژگی (۱۲۶۵/۴ گرم در مترمربع) از محلول‌پاشی براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار و آبیاری در حد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی حاصل شد که با سایر تیمارهای محلول‌پاشی و تیمار عدم محلول‌پاشی در این سطح از آبیاری، از نظر آماری در یک گروه قرار گرفتند (جدول ۴). محلول‌پاشی براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار و آبیاری در حد ۷۵ درصد ظرفیت زراعی (تنش ملایم) با عملکرد ماده خشکی معادل ۱۲۰۲/۲ گرم در مترمربع با شاهد محلول‌پاشی در آبیاری در حد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (۱۲۳۵/۲ گرم در مترمربع) اختلاف معنی‌داری نداشت، درحالی‌که عملکرد ماده خشک در تیمار محلول‌پاشی براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار و آبیاری در حد ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، کاهش ۱۴/۳۳ درصدی را نسبت به شاهد محلول‌پاشی در آبیاری در حد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (۱۲۳۵/۲ گرم در مترمربع) و ۱۶/۳۸ درصدی را نسبت به محلول‌پاشی براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار و آبیاری در حد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی نشان داد. کمترین عملکرد ماده خشک تولیدی متعلق به شاهد محلول‌پاشی و آبیاری در حد ۵۰ درصد ظرفیت زراعی بود که با عملکرد ماده خشک معادل ۷۵۳/۵ گرم در مترمربع، کاهشی معادل ۲۳/۰۷ درصد نسبت به تیمار ذکر شده با حداکثر عملکرد ماده خشک یعنی براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار و آبیاری در حد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی نشان داد (جدول ۴). در هر سه سطح تیمار آبیاری محلول‌پاشی با براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار منجر به تولید بیشترین ماده خشک گردید. براسینواستروئید از طریق افزایش مقدار کلروفیل، عملکرد آنزیم‌های رابیسکو و آنتی‌اکسیدان، افزایش سنتز کربوهیدرات و بهبود پتانسیل آبی باعث افزایش ماده خشک گردید

(bAnjume *et al.*, 2011). وزن تر و خشک گیاه چغندر قند (*Beta vulgaris*) در اثر استفاده از ۲۴ اپی براسینولید افزایش نشان داد (Schilling, Schiller, & Otto, 1991). استفاده از ۲۴ اپی براسینولید در گیاه شمعدانی عطری (*Pelargonium graveolens*)، افزایش سرعت فتوسنتز برگ‌ها و در نهایت، افزایش تجمع زیست‌توده اندام هوایی و افزایش رشد را به دنبال داشت. افزایش سرعت فتوسنتز مربوط به افزایش شاخص کلروفیل برگ‌ها، نتیجه استفاده از این هورمون گزارش شده است (Sengupta, Banik, Bhui, & Mitra, 2011). افزایش عملکرد ماده خشک با کاربرد براسینواستروئید می‌تواند به‌دلیل توسعه بیشتر سطح برگ باشد که با ایجاد یک منبع فیزیولوژیکی کارآمد باعث استفاده هرچه بیشتر از نور دریافتی و در نتیجه، افزایش عملکرد ماده خشک بیشتر شده است. دهقان و همکاران (Dehghan , Balouchi, Yadavi, & Safikhani, 2017) نیز افزایش در میزان عملکرد زیستی گندم که با براسینولید محلول‌پاشی شده بود را گزارش نمودند.

وزن هزار دانه: اثر سال و اثرات تنش خشکی و محلول‌پاشی بر این ویژگی معنی‌دار بود (جدول ۲). نتایج مقایسه میانگین نشان داد که وزن هزار دانه در سال اول ۵/۶۴ درصد بیشتر از سال دوم است (جدول ۳). این امر احتمالاً به‌دلیل پایین‌تر بودن درجه حرارت حداکثر در طی دوران زایشی در سال اول باشد (شکل ۱). مقایسه میانگین‌های این ویژگی تحت تأثیر خشکی نشان داد که افزایش شدت تنش خشکی، کاهش میزان آبیاری به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی، منجر به کاهش معنی‌دار وزن هزار دانه شد، به‌طوری‌که این کاهش در تنش ملایم و شدید به‌ترتیب برابر با ۶/۷۷ و ۳۸ درصد بود (جدول ۵). وزن هزار دانه تابع سرعت و طول دوره پرشدن دانه است و خشکی هر دو این عامل‌ها را تحت تأثیر قرار داده و کاهش می‌دهد و مشارکت دو عامل سرعت و طول دوره پرشدن دانه، تعیین‌کننده وزن نهایی دانه است (Alvaro, Isidro, Villegas, García del Moral, 2008). در تحقیقی در مورد اثر تنش رطوبتی بر اجزای عملکرد گندم مشخص گردید که وزن دانه تأثیرپذیرترین جزو عملکرد می‌باشد. آن‌ها اظهار داشتند که وزن هزار دانه در شرایط تنش شدید، ۱۹ درصد افت را نشان داد. لذا، تنش خشکی از طریق کاهش وزن هزار دانه موجب کاهش عملکرد دانه می‌گردد (Barjasteh, Nezami, Khazaie, & Zand, 2019). به نظر می‌رسد که عوامل کاهش‌دهنده وزن هزار دانه نتیجه کاهش میزان فتوسنتز، کربوهیدرات و توزیع نامناسب مواد ذخیره‌ای در شرایط تنش شدید خشکی باشد (Gholipour, Ebadi, & Permon, 2016). مقایسه میانگین‌های این ویژگی تحت تأثیر محلول‌پاشی نشان داد که کمترین (۱/۱۶ گرم) و بیشترین (۱/۳۷ گرم) مقدار این ویژگی به‌ترتیب از تیمار عدم محلول‌پاشی و محلول‌پاشی با ۰/۵ میکرومولار براسینواستروئید به‌دست آمد. سه تیمار دیگر بدون اختلاف معنی‌دار با یکدیگر دارای وزن هزار دانه بیشتری نسبت به شاهد بودند (جدول ۶). براسینواستروئید به علت افزایش تقسیم سلولی و طویل شدن سلول منجر به افزایش وزن هزار دانه گردید (Asha & Lingakumar, 2015). اسکندری (Eskandari, 2011) نیز افزایش وزن هزار دانه با مصرف براسینواستروئید را گزارش نمود.

شاخص برداشت: این ویژگی به‌طور معنی‌داری تحت تأثیر اثر متقابل خشکی × سال و اثر متقابل خشکی × محلول‌پاشی قرار گرفت (جدول ۲). بالاترین مقدار این شاخص (۲۴/۱) در سال دوم و از تیمار آبیاری در حد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی حاصل شد (جدول ۷) و با افزایش شدت تنش خشکی به ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی روند کاهشی نشان داد، به‌طوری‌که پایین‌ترین مقدار آن در تیمار آبیاری ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در همین سال حاصل شد که ۱۵/۳۳ درصد و به‌طور معنی‌داری کمتر از مقدار حداکثر بود. مشابه سال دوم، بیشترین مقدار این شاخص در سال اول مربوط به تیمار آبیاری در حد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی بود که تنها ۰/۸۳ درصد کمتر از همین تیمار در سال دوم بود. روند کاهشی این ویژگی در سال اول نیز با افزایش شدت تنش ثبت گردید، اما معنی‌دار نبود. مقایسه میانگین‌های این ویژگی تحت تأثیر اثر متقابل خشکی و محلول‌پاشی (جدول ۴) نشان داد که محلول‌پاشی در تیمار آبیاری در حد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی، این ویژگی را تحت تأثیر قرار نداد، درحالی‌که با افزایش شدت تنش، محلول‌پاشی منجر به رفتار متفاوت در این ویژگی شد. محلول‌پاشی با براسینواستروئید در غلظت ۰/۵ میکرومولار در هر دو سطح تنش، بالاترین مقدار این ویژگی را باعث شدند، اما تنها در سطح تنش شدید خشکی منجر به افزایش معنی‌دار ۱۳/۵۷ درصدی نسبت به شاهد در همین سطح تنش گردید.

به هر حال، این شاخص در محلول‌پاشی براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار با تنش ملایم (۲۳/۸۴درصد) تفاوت معنی‌داری با آن در شاهد (۲۴/۱ درصد) با سطح نرمال آبیاری نداشت. ملاتونین در شرایط عدم تنش و تنش ملایم تأثیر معنی‌داری بر این شاخص نداشت، اما در شرایط تنش شدید در هر دو غلظت باعث افزایش معنی‌داری نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی در شرایط ذکرشده گردید (جدول ۴). شاخص برداشت حاکی از کارآیی توزیع ماده فتوسنتزی در بین اندام‌های مختلف گیاه است و بنابراین، شاخصی از قابلیت گیاه برای تخصیص منابع به اندام‌های رویشی و زایشی است (Carrotero, Serrayo, Bnet, Perello, & Miralles, 2010). در تحقیقی، شاخص برداشت رقم Titicaca بسته به سال و تاریخ کاشت بین ۴۲ تا ۵۷ درصد و رقم Regalona 30 درصد گزارش شده است که دلیل اصلی تفاوت این ویژگی در مطالعه مذکور به بالا بودن عملکرد دانه کینوا در آزمایش ذکرشده برمی‌گردد (Lavini *et al.*, 2014).

جدول ۷- مقایسه میانگین‌های ویژگی‌های اندازه‌گیری‌شده متأثر از اثر متقابل سال و خشکی (آبیاری بر حسب درصد از ظرفیت زراعی)
Table 7- Means comparison of measured traits affected by interaction of year and irrigation

سال Year	خشکی Drought (% of field capacity)	عملکرد Yield (g m^{-2})	شاخص برداشت Harvest index (%)
1	100	299.3 ^{a*}	23.9 ^{a}
1	75	285.4 ^{a}	23.6 ^{ab}
1	50	211.5 ^{b}	21.5 ^{ab}
2	100	300.5 ^{a}	24.1 ^{a}
2	75	269.2 ^{a}	23.8 ^{a}
2	50	189.7 ^{b}	20.4 ^{b}

* در هر ستون، میانگین‌هایی که دارای حروف مشترک هستند، براساس آزمون دانکن در سطح احتمال پنج درصد تفاوت معنی‌داری ندارند
* Means in each column followed by the similar letter(s) are not significantly different at %5 probability level, using Duncan multiple range test

قاسمی و همکاران (Ghasemi *et al.*, 2021) با انجام آزمایشی روی آفتابگردان، اثر مثبت براسینولید بر شاخص برداشت را گزارش نمودند. در شرایط تنش خشکی، کمبود آب باعث کاهش توانایی گیاه در جذب عناصر غذایی، ساخت و انتقال مواد پرورده می‌شود و این امر، شاخص برداشت را کاهش می‌دهد. در این خصوص به نقش براسینوستروئید در بهبود تنش آب در مطالعات زیادی اشاره شده است (Mohanabharathi, Sritharan, Senthil, & Aien, 2020; Roudbari, Abbaspour, Kalantari, & Ravikesavan, 2019). یافته‌های تحقیقاتی در سال‌های اخیر حاکی از این است که ملاتونین یک ترکیب بسیار مفید برای کاهش اثرات تنش‌های زیست‌محیطی، به‌خصوص تنش خشکی می‌باشد (Shi, Chen, Wei, & He, 2016).

عملکرد دانه

اثر متقابل سال و خشکی در سطح احتمال پنج درصد و اثر متقابل تنش خشکی و محلول‌پاشی در سطح احتمال یک درصد بر عملکرد دانه معنی‌دار بود (جدول ۲). اختلاف بسیار جزئی در عملکرد دانه در تیمارهای آبیاری در حد ۱۰۰ و ۷۵ درصد ظرفیت زراعی در دو سال آزمایش معنی‌دار نبود، اما عملکرد تولیدی هر دو این تیمارها به‌طور معنی‌داری از تیمارهای آبیاری در حد ۵۰ درصد ظرفیت زراعی در هر دو سال آزمایش بیشتر بودند. تنها در تنش شدید (آبیاری در حد ۵۰ درصد ظرفیت زراعی) میزان عملکرد در سال اول (۲۱۱/۵ گرم در مترمربع) ۱۱/۵ درصد نسبت به سال دوم بیشتر بود (جدول ۷) که این احتمالاً به‌واسطه درجه حرارت‌های حداکثر پایین‌تر در سال اول در دوره زایشی باشد که از شدت تنفس گیاه کاسته و لذا مواد فتوسنتزی بیشتری به دانه‌ها منتقل شده و عملکرد افزایش پیدا کرده است. مقایسه‌های میانگین اثر متقابل خشکی و محلول‌پاشی بر عملکرد (جدول ۴) نشان می‌دهد که کاربرد ۰/۵ میکرومولار براسینواستروئید در آبیاری در حد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی (نرمال) بیشترین عملکرد دانه (۳۰۲/۸ گرم در مترمربع) را تولید نمود که با سایر تیمارهای محلول‌پاشی و تیمار عدم محلول‌پاشی در این سطح از آبیاری تفاوت معنی‌داری نداشت و از بالاترین عملکردهای حاصله در تیمارهای با کاربرد ۰/۵ میکرومولار براسینواستروئید و آبیاری در حد ۷۵ و ۵۰ درصد ظرفیت زراعی به‌ترتیب ۳۲ و ۵/۷ درصد بیشتر بود که این افزایش ها معنی‌دار بودند. عملکرد تولیدی کلیه تیمارهای محلول‌پاشی در تنش ملایم شامل شاهد مربوطه، عدم محلول‌پاشی، به‌طور معنی‌داری از عملکردهای حاصل از این تیمارها در شرایط تنش شدید خشکی بیشتر بودند. کمترین عملکرد تولیدی برای تیمار تنش شدید و بدون استفاده از تنظیم‌کننده‌های رشد ثبت گردید. در شرایط تنش شدید، همه تیمارهای محلول‌پاشی باعث افزایش معنی‌دار عملکرد نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی شدند. در این شرایط، مشابه تنش ملایم خشکی (آبیاری در حد ۷۵ درصد ظرفیت زراعی) همچنین بیشترین افزایش متعلق به براسینواستروئید ۰/۵ میکرومولار بود. همان‌طور که از نتایج تحقیق حاضر برمی‌آید، تنش خشکی، عملکرد دانه کینوا را کاهش داد. بااین‌حال، در هر دو شرایط ملایم و شدید خشکی، کاربرد براسینولید ۰/۵ میکرومولار، عملکرد را افزایش داد (جدول ۴). آنجوم و همکاران (Anjum *et al.*, 2017) در پژوهشی روی ذرت در شرایط تنش خشکی، کاهش عملکرد را نتیجه کاهش فعالیت فتوسنتزی، کاهش کربوهیدرات و سایر قندها گزارش نمودند. براسینواستروئید ممکن است با تغییر فعالیت‌های آنزیمی و افزایش پایداری غشاء کلروپلاست که در نهایت، منجر به عرضه قوی فتوآسیمیلات‌ها می‌شود، عملکرد دانه را افزایش دهد (Yue *et al.*, 2019). بهبود قابل‌ملاحظه‌ای در عملکرد ذرت با کاربرد خارجی براسینواستروئید در شرایط تنش خشکی گزارش شده است (Talaat,

Shawky, & Ibrahim, 2015; Anjum *et al*., 2011a). تیمار گیاهان با ۲۴- اپی براسینولید می‌تواند با افزایش سطح اسید آبسیزیک و از طریق افزایش سرعت پر شدن دانه و کوتاه کردن مدت آن باعث بهبود عملکرد شود (Farooq, Hussain, & Siddique, 2014). ملاتونین نیز در هر دو غلظت به‌کار برده‌شده باعث افزایش معنی‌دار عملکرد نسبت به تیمار عدم محلول‌پاشی در شرایط تنش شدید خشکی شد. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که ملاتونین از طریق سازوکارهای متفاوتی می‌تواند اثرات منفی خشکی بر گیاهان را کاهش داده و عملکرد آن‌ها را تحت این شرایط دشوار بهبود بخشد. ملاتونین به‌عنوان یک آنتی‌اکسیدان قوی به کاهش سطح گونه‌های فعال اکسیژن که در شرایط تنش خشکی افزایش می‌یابند، کمک می‌کند. این عمل باعث حفظ سیستم فتوسنتزی و کاهش آسیب‌های اکسیداتیو می‌گردد (Ahmad *et al*., 2021). همچنین کاربرد ملاتونین باعث افزایش محتوای پروتئین‌های محلول و مواد تنظیم‌کننده اسمزی مانند پرولین و قندهای محلول در گیاهان تحت تنش خشکی می‌شود. این مواد به گیاهان کمک می‌کنند تا توانایی بهتری برای حفظ آب و کاهش آسیب‌های ناشی از خشکی داشته باشند (Ahmad *et al*., 2021) و در نتیجه، عملکرد بالاتری حاصل گردد.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، می‌توان بیان نمود که با کاهش سطح آب آبیاری از ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی و یا با افزایش سطح تنش خشکی، ارتفاع بوته، سرعت رشد گیاه، شاخص سطح برگ، وزن هزار دانه و شاخص برداشت کاهش، درحالی‌که میزان کلروفیل فلورسانس، محتوای پرولین و میزان کربوهیدرات‌های محلول افزایش پیدا کردند. علی‌رغم افزایش در ویژگی‌های ذکرشده، وزن خشک گیاه و نهایتاً عملکرد دانه تحت شرایط تنش خشکی کاهش پیدا کرد. به عبارتی، سیستم دفاعی ذاتی گیاه قادر به مقابله با شرایط دشوار در سطح به‌وجود آمده نبود، اما کاربرد براسینواستروئید و ملاتونین با تأثیر بر ویژگی‌های ذکرشده، توان گیاه را تا حدی افزایش دادند. تأثیر ملاتونین در بعضی ویژگی‌ها، به‌خصوص در غلظت بالاتر به‌کار برده‌شده مؤثرتر از براسینواستروئید بود، اما به‌طورکلی، و در اکثر ویژگی‌های مورد مطالعه، کاربرد غلظت بالاتر براسینواستروئید یعنی ۰/۵ میکرومولار در هر سه شرایط آبیاری و به‌خصوص در شرایط تنش ملایم و شدید خشکی مؤثرتر واقع شد و توانست با تأثیر مثبت بر ویژگی‌های ذکرشده یعنی افزایش ارتفاع بوته، سرعت رشد، شاخص سطح برگ، وزن هزار دانه، شاخص برداشت، محتوای پرولین، کربوهیدرات‌های محلول و کاهش کلروفیل فلورسانس منجر به افزایش وزن خشک و در نهایت، عملکرد دانه شود. عملکرد دانه حاصل از تیمار ۰/۵ میکرومولار براسینواستروئید در شرایط تنش ملایم (آبیاری در حد ۷۵ درصد ظرفیت زراعی) نسبت به تیمار آبیاری نرمال (آبیاری در حد ۱۰۰ درصد ظرفیت زراعی) و بدون محلول‌پاشی، تنها ۳/۷۳ درصد کمتر بود. لذا با توجه به قرار گرفتن کشورمان در منطقه خشک از یک طرف و مواجه شدن با شرایط خشکسالی در سال‌های اخیر از طرف دیگر، استفاده از این هورمون گیاهی می‌تواند تأثیرات منفی تنش خشکی بر گیاهان از جمله کینوا را کاهش داده و راه حلی مؤثر برای افزایش تولیدات کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد.

References

1. Ahmad, S., Muhammad, I., Wang, G. Y., Zeeshan, M., Yang, L., Ali, I., & Zhou, X. (2021). Ameliorative effect of melatonin improves drought tolerance by regulating growth, photosynthetic traits and leaf ultrastructure of maize seedlings. *BMC Plant Biology*, *21*, 368. https://doi.org/10.1186/s12870-021-03160-w
2. Ali, B., Hayat, S., & Ahmad, A. (2007). 28-Homobrassinolide ameliorates the saline stress in chickpea (Cicer arietinum L.). *Environmental Experimental Botany*, *59*(2), 217-223 https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.002
3. Alizadeh, A. (2001). *Practical Hydrology Principles*. Astan Ghods Razavi Press, Mashhad, Iran. (In Persian)
4. Alvaro, F., Isidro, J., Villegas, D., García del Moral, L. F., & Royo, C. (2008). Breeding effects on grain filling, biomass partitioning, and remobilization in Mediterranean durum wheat. *Agronomy Journal*, *100*(2), 361-370. https://doi.org/10.2134/agronj2007.0090
5. Anjum, S. A., Ashraf, U., Zohaib, A., Tanveer, M., Naeem, M., Ali, I., & Nazir, U. (2017). Growth and development responses of crop plants under drought stress: A review. *Zemdirbyste*, *104*(3), 26. ttps://doi.org/10.13080/Z-A.2017.104.034
6. Anjum, S. A., Wang, L. C., Farooq, M., Hussain, M., Xue, L. L., & Zou, C. M. (2011a). Brassinolide application improves the drought tolerance in maize through modulation of enzymatic antioxidants and leaf gas exchange. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *197*(3), 177-185. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2010.00459.x
7. Anjum, S. A., Xie, X. Y., Wang, L. C., Saleem, M. F., Man, C., & Lei, W. (2011b). Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, *6*(9), 2026-2032. https://doi.org/10.4236/ajps.2011.23036
8. Aranjuelo, I., Molero, G., Erice, G., Christophe Avice, J., & Nogués, S. (2011). Plant physiology and proteomics reveals the leaf response to drought in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Journal of Experimental Botany*, *62*(1), 111-

123. https://doi.org/10.1093/jxb/erq249
9. Asha, A., & Lingakumar, K. (2015). Effect of 24-epibrassinollide on the morphological and biochemical constitutions *Vigna unguiculata* (L.) seedlings. *Indian Journal Science Research and Technology*, *3*(1), 35-39.
10. Ashraf, M. F. M. R., & Foolad, M. R. (2007). Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, *59*(2), 206-216. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006
11. Ashraf, M., Akram, N. A., Arteca, R. N., & Foolad, M. R. (2010). The physiological, biochemical and molecular roles of brassinosteroids and salicylic acid in plant processes and salt tolerance. CRC. *Critical Review Plant Science*, *29*(3), 162-190. https://doi.org/10.1080/07352689.2010.483580
12. Babai, K., AminiDehagi, M., Modares-Sanavi, S. A. M., & Jabbari, R. (2010). Effect of water stress on morphological characteristics, content of proline and thymol in thyme. Iran. *Journal of Medicinal and Aromatic Plants*, *26*(2), 251-239. (In Persian). https://doi.org/10.22092/ijmapr.2010.6939
13. Bajguz, A., & Hayat, S. (2009). Effects of brassinosteroids on the plant responses to environmental stresses. *Plant Physiology Biochemistry*, *47*(1), 1-8. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.10.002
14. Barjasteh, A., Nezami, A., Khazaie, H., & Zand, E. (2019). Effects of deficit irrigation and wild oat (*Avena ludoviciana*) density on yield and yield components of wheat. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *17*(1), 1-14. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/gsc.v17i1.57485
15. Bates, L. S., Waldren, R. P., & Teare, I. D. (1973). Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*, *39*, 205–207. https://doi.org/10.1007/BF00018060
16. Bera, A. K., Singh, A. L., & Kumar, R. (2014). Influence of brassinolide foliar application on growth and yield of sunflower (*Helianthus annuus* L.). *Journal of Plant Growth Regulation*, *33*(2), 385-395. https://doi.org/10.1007/s00344-014-9402-5
17. Bijanzadeh, E., Nosrati, K., & Egan, T. (2010). Influence of seed priming techniques on germination and emergence of rapeseed (*Brassica napus* L.). *Seed Science and Technology*, *38*, 242-247. (In Persian). https://doi.org/10.22067/gsc.v17i1.57485
18. Boroujerdnia, M., Bihamta, M., Alami Said, K., & Abdossi, V. (2016). Effect of drought tension on proline content, soluble carbohydrates, electrolytes leakage and relative water content of bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Scientific Journal of Crop Physiology*, I.A.U. Ahvaz, *8*(29), 23-41. (in Persian). http://dorl.net/dor/20.1001.1.2008403.1395.8.29.2.2
19. Carrotero, R., Serrayo, R. A., Bnet, M. O., Perello, A. E., & Miralles, D. J. (2010). Absorbed radiotion and radiation use efficiency as effected by foliar diseases in relation to their vertical position into the canopy in wheat. *Field Crops Reserch*, *916*, 189-195. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2009.12.009
20. Dashab, S., & Omidi, H. (2021). Investigation the effect of drought tension and seed pretreatment on physiological and biochemical traits of quinoa (*Chenopodium quinoa*). *Scientific Journal of Crop Physiology*, *12*(48), 5-23.
21. Dawood, M. G. (2018). Improving drought tolerance of quinoa plant by foliar treatment of trehalose. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, *19*(5), 245-254.
22. Dehghan, M., Balouchi, H. R., Yadavi, A. R., & Safikhani, F. (2017). Effect of foliar application of brassinolide on grain yield and yield components of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) cv. Sirvan under terminal drought stress conditions. *Iranian Journal Crop Science*, *19*(1), 40-56. (in Persian) http://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1396.19.1.4.0
23. Elewa, T. A., Sadak, M. S., & Saad, A. M. (2017). Proline treatment improves physiological responses in quinoa plants under drought stress. *Bioscience Research*, *14*(1), 21-33.
24. Eskandari, M. (2011). The effect of 28-Homobrassinolid in reducing the effects of drought in savory herbs. *International Journal Plant Physiology Biochemistry*, *3*(11), 183-187.
25. Farooq, M., Wahid, A., & Basra, S. M. A. (2009). Improving water relations and gas exchange with brassinosteroids in rice under drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *195*(4), 262-269. https://doi.org/10.1111/j.1439-037X.2009.00368.x
26. Farooq, M., Hussain, M., & Siddique, K. H. M. (2014). Drought stress in wheat during flowering and grain-filling periods. *Critical Reviews in Plant Sciences*, *33*(4), 331–349. https://doi.org/10.1080/07352689.2014.875291
27. Farshad, A., Mirzaei, H., & Rezaei, M. (2023). Effects of exogenous melatonin on growth and yield of broccoli (*Brassica oleracea*) under different irrigation regimes. *Journal of Plant Physiology and Biochemistry*, *178*, 102-112. https://doi.org/10.1016/j.jplph.2023.02.005
28. Gardner, F. P., Pearce, R. B., & Mitchell, R. L. (1985). *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press, Ames, Iowa, USA.
29. Ghasemi, M., Jahanbeen, S., Latifmanesh, H., Faraji, H., & Mirshekari, A. (2021). Effect of brasinolid foliar application on some physiological and agronomic characteristics of sunflower (*Helianthus annuus* L) under drought stress condition. *Journal of Crop Production*, *14*(1), 31-48. https://doi.org/10.22069/EJCP.2021.18084.2339
30. Gholipour, S., Ebadi, A., & Permon, G. H. (2016). Components of different genotypes of grain of bread wheat. *Crop Physiology Jouranl*, *8*(11), 111-128.

31. Golestanifar, F., Mahmoodi, S., Fallahi, H. R., & Shahidi, A. (2024). Evaluation of physiological growth analysis of some quinoa (Chenopodium quinoa Willd.) varieties under different moisture levels in spring and summer planting dates at South Khorasan region. *Iranian Journal of Field Crops Research, 22*(1), 45-70. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2023.82969.1255
32. Gonzalez, J. A., Gallardo, M., Hilal, M. B., Rosa, M. D., & Prado, F. E. (2009). Physiological responses of quinoa (*Chenopodium quinoa*) to drought and waterlogging stresses: Dry matter partitioning. *Botanical Studies*, *50*(1), 35–42.
33. Hasanzadeh, H., Shakerdargah, G., & Darjani, F. (2013). *Determination of the best planting date of quinoa (Chenopodium quinoa) in South coast of Iran*. The First National Electronic Conference on Advanced Topics in Horticultural Science. 19 and 20 November, Jahrom University, Iran.
34. Irigoyen, J. J., Einerich, D. W., & Sánchez-Díaz, M. (1992). Water stress induced changes in concentrations of proline and total soluble sugars in nodulated alfalfa (*Medicago sativa*) plants. *Physiologia Plantarum*, *84*(1), 55-60. https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1992.tb08764.x
35. Jacobsen, S. E., Liu, F., & Jensen, C. R. (2009). Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Scientia Horticulturae*, *122*(2), 281-287. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.05.019
36. Jaleel, C. A., Manivannan, P., Wahid, A., Farooq, M., Somasundaram, R., & Panneerselvam, R. (2009). Drought stress in plants: A review on morphological characteristics and pigments composition. *International Journal of Agriculture and Biology*, *11*, 100-105
37. Janas, K. M., & Posmyk, M. M. (2013). Melatonin, an underestimated natural substance with great potential for agricultural application. *Acta Physiologiae Plantarum*, *35*, 3285-3292. https://doi.org/10.1007/s11738-013-1372-0
38. Jemima, J., Bhattacharjee, P., & Singhal, R. S. (2011). Melatonin a review on the lesser-known potential nutraceutical. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, *2*(8), 1975-87. http://doi.org/10.13040/IJPSR.0975-8232.2(8).1975-87
39. Kitajima, M., & Butler, W. L. (1975). Quenching of chlorophyll fluorescence and primary photochemistry in chloroplasts by dibromothymoquinone. *Biochimica et Biophysica Acta*, *376*(1), 105-115. https://doi.org/10.1016/0005-2728(75)90209-1
40. Lavini, A., Pulvento, C., d'Andria, R., Riccardi, M., Choukr-Allah, R., Belhabib, O., Yazar, A., Incekaya, Ç., Metin Sezen, S., Qadir, M., & Jacobsen, S. E. (2014). Quinoa's potential in the Mediterranean region. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *200*, 344-360. https://doi.org/10.1111/jac.12069
41. Li, J., Yang, P., Gan, Y., Yu, J., & Xie, J. (2015). Brassinosteroid alleviates chilling-induced oxidative stress in pepper by enhancing antioxidation systems and maintenance of photosystem II. Acta Physiologia Plantarum, 37(11):222. https://doi.org/10.1007/s11738-015-1966-9
42. Li, Z., Zhang, S., Li, S., Li, H., Yan, L., Wang, Y., Zhang, Q., & Zhang, S. (2021). Melatonin enhances drought tolerance by regulating leaf stomatal behavior, carbon and nitrogen metabolism, and related gene expression in maize plants. *Frontiers in Plant Science*, *12*, 703303. https://doi.org/10.3389/fpls.2021.703303
43. Li, H., Liu, Y., Zhen, B., Lv, M., Zhou, X., Yong, B., Niu, Q., & Yang, S. (2024). Proline spray relieves the adverse effects of drought on wheat flag leaf function. *Plants*, *13*(7), 957. https://doi.org/10.3390/plants13070957
44. Miranda-Apodaca, J., Yoldi-Achalandabaso, A., Aguirresarobe, A., Del-Canto, A., & Pérez-López, U. (2018). Similarities and differences between the responses to osmotic and ionic stress in quinoa from a water use perspective. *Agricultural Water Management*, *203*, 344-352. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.026
45. Mohanabharathi, M., Sritharan, N., Senthil, A., & Ravikesavan, R. (2019). Physiological studies for yield enhancement in finger millet under drought condition. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, *8*(3), 3308-3312.
46. Ozoni Davaji, A., Esfahani, M., Sami Zadeh, H., & Rabiei, M. (2008). Effect of planting pattern and plant density on growth indices and radiation use efficiency of apetalous flowers and petalled rapeseed (*Brassica napus* L.) cultivars. *Iranian Journal of Crop Sciences*, *9*(4), 382-400. (in Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.15625540.1386.9.4.7.9
47. Parkash, V., & Singh, S. (2020). A review on potential plant-based water stress indicators for vegetable crops. *Sustainability*, *12*(12), 3945. https://doi.org/10.3390/su12123945
48. Ranjan, A., Archana, K., & Ranjan, S. (2017). Gossypium herbaceum ghcyp1 regulates water-use efficiency and drought tolerance by modulating stomatal activity and photosynthesis in transgenic tobacco. Biosciences. *Biotechnology Research Asia, 14*(3), 869-880. https://doi.org/10.13005/bbra/2520
49. Reiter, R. J., Tan, D. X., Zhou, Z., Cruz, M. H. C., Fuentes-Broto, L., & Galano, A. (2015). Phytomelatonin: Assisting plants to survive and thrive. *Molecules*, *20*, 7396-7437. https://doi.org/10.3390/molecules20047396
50. Roudbari, N., Abbaspour, H., Kalantari, K., & Aien, A. (2020). The role of signaling of hydrogen peroxide and 24-epibrassinosteroid on physiological traits of cumin (*Cuminum cyminum* L.) under drought stress. *Iranian Journal of Plant Physiology*, *10*(3), 3243-3254. https://doi.org/10.30495/ijpp.2020.1893417.1204
51. Ruiz-Sanchez, M. C., Domingo, R., Torrecillas, A., & Perez-Pastor, A. (2000). Water stress preconditioning to

improve drought resistance in young apricot plants. *Plant Science*, *156*, 245-251. https://doi.org/10.1016/S0168-9452(00)00262-4

52. Salek Mearaji, H., Tavakoli, A., & Sepahvand, N. A. (2020). Evaluating the effect of cytokinin foliar application on morphological traits and yield of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.) under optimal irrigation and drought stress conditions. *Journal of Crop Ecophysiology*, *14*(4), 479-498. https://doi.org/10.22059/jci.2020.292821.2298
53. Sarafraz Ardekani, M. R. (2019). Kinetin and 24-epibrassinolide - induced antioxidant responses in three wheat cultivars during drought stress in grain filling stage. *Plant Process and Function*, *8*(29), 313-327. http://jispp.iut.ac.ir/article-1-898-fa.html
54. Schilling, G., Schiller, C., & Otto, S. (1991). Influence of brassinosteroid on organ retention and enzyme activities of sugarbeet plants. In: H. G. Cutler T. Yokota and G. Adam (Eds.), Brassinosteroids. *Chemistry, Bioactivity and Applications*. American Chemica Society, Washington DC, USA. pp. 208-219.
55. Sengupta, K., Banik, N. C., Bhui, S., & Mitra, S. (2011). Effect of brassinolide on growth and yield of summer green gram crop. *Journal of Crop and Weed*, *7*(2), 152-154.
56. Shah, F. A., Ullah, A., Dar, M. H., & Komatsu, S. (2020). Melatonin as a potent antioxidant for abiotic stress tolerance in plants: Advances and prospects. *Plant Science*, *290*, 110285. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2019.110285
57. Shi, H., Chen, K., Wei, Y., & He, C. (2016). Fundamental issues of melatonin-mediated stress signaling in plants. *Frontiers in Plant Sciecnce*, *7*, 11-24. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01124
58. Sun, Y., Liu, F., Bendevis, M., Shabala, S., & Jacobsen, S. E. (2014). Sensitivity of two quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) varieties to progressive drought stress. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *200*(1), 12-23. https://doi.org/10.1111/jac.12042
59. Talaat, N. B., Shawky, B. T., & Ibrahim, A. S. (2015). Alleviation of drought-induced oxidative stress in maize (*Zea mays* L.) plants by dual application of 24-epibrassinolide and spermine. *Environmental and Experimental Botany*, *113*, 47-58. https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2015.01.006
60. Tan, D. X. (2015). Melatonin and plants. *Journal of Experimental Botany*, *66*, 625-625. https://doi.org/10.1093/jxb/eru523
61. Tan, D. X., Hardeland, R., Manchester, L. C., Korkmaz, A., Ma, S., RosalesCorral, S., & Reiter, R. J. (2012). Functional roles of melatonin in plants, and perspectives in nutritional and agricultural science. *Journal of Experimental Botany*, *63*, 577-597. https://doi.org/10.1093/jxb/err256
62. Telahigue, D. C., Yahia, L., Aljane, B. F., Belhouchett, K., & Toumi, L. (2017). Grain yield, biomass productivity and water use efficiency in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) under drought stress. *Journal of Scientific Agriculture*, *1*, 222-232. https://doi.org/10.25081/jsa.2017.v1.67
63. Torrecillas, A., Rodriguez, P., & Sanchez-Blanco, M. J. (2003). Comparision of growth, leaf water relations and gas exchange of *Cistus albidus* and *Cistus monspeliensis* plants irrigated with water of different NaCl salinity levels. *Scientia Horticulture*, *97*, 353-368. https://doi.org/10.1016/S0304-4238(02)00161-9
64. Vardhini, B. V., & Anjum, N. A. (2015). Brassinosteroids make plant life easier under abiotic stresses mainly by modulating major components of antioxidant defense system. *Frontiers in Environmental Science*, *2*, 67. https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00067
65. Vega-Gálvez, A., Miranda, M., Vergara, J., Uribe, E., Puente, L., & Martínez, E. A. (2010). Nutrition facts and functional potential of quinoa (*Chenopodium quinoa* willd.), an ancient Andean grain: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *90*, 2541-2547. https://doi.org/10.1002/jsfa.4158
66. Vriet, C., Russinova, E., & Reuzeau, C. (2012). Boosting crop yields with plant steroids. *Plant Cell*, *24*(3), 842-857. https://doi.org/10.1105/tpc.111.094912
67. Wang, P., Sun, X., Li, C., Wei, Z., Liang, D., & Ma, F. (2013). Long -term exogenous application of melatonin delays drought -induced leaf senescence in apple. *Journal of Pineal Research*, *54*, 292 -302. https://doi.org/10.1111/jpi.12017
68. Xu, Z., Huang, S., Xie, Y., Wang, S., Jin, N., Jin, L., Tie, J., Meng, X., Li, Z., Lyu, J., & Yu, J. (2023). Physiological responses of coriander (*Coriandrum sativum* L.) to exogenous 2,4-epibrassinolide at different concentrations. *BMC Plant Biology*, *23*, 649. https://doi.org/10.1186/s12870-023-04684-z
69. Yari, P., Keshtkar, A. H., & Sepehri, A. (2014). Evaluation of water stress effect on growth and yield of spring safflower. *Plant Products Technology*, *14*(2), 101-117. (in Persian).
70. Yue, J., You, Y., Zhang, L., Fu, Z., Wang, J., Zhang, J., & Guy, R. D. (2019). Exogenous 24- epibrassinolide alleviates effects of salt stress on chloroplasts and photosynthesis in *Robinia pseudoacacia* L. seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*, *38*(2), 669-682. https://doi.org/10.1007/s00344-018-9881-0
71. Zhang, N., Zhao, B., Zhang, H. J., Weeda, S., Yang, C., Yang, Z. C., Ren, S., & Guo, Y. D. (2013). Melatonin promotes water-stress tolerance, lateral root formation, and seed germination in cucumber (*Cucumis sativus* L.). *Journal of Pineal Research*, *54*(1), 15-23. https://doi.org/10.1111/j.1600-079X.2012.01015.x
72. Zhang, N., Sun, Q. Q., Zhang, H. J., Cao, Y. Y., Weeda, S., & Ren, S. X. (2015). Role of melatonin in abiotic stress resistance in plants. *Journal of Experimental Botany*, *66*, 647-656. https://doi.org/10.1093/jxb/eru336

73. Zhao, H., Ye, L., Wang, Y., Zhou, C., & Wang, J. (2017). Melatonin acts as a growth-stimulating and growth-inhibitory hormone in plants, depending on its concentration. *Journal of Experimental Botany*, *68*(9), 2191-2203. https://doi.org/10.1093/jxb/erx098
74. Zhou, Y. L., You, X. Y., Wang, X. Y., Cui, L. H., Jiang, Z. H., & Zhang, K. P. (2024). Exogenous 24-epibrassinolide enhanced drought tolerance and promoted BRASSINOSTEROID-INSENSITIVE2 expression of quinoa. *Plants*, *13*, 873. https://doi.org/10.3390/plants13060873